

BARBARA JUROSZEK

Instytut Metrologii Elektrycznej
Politechnika Wrocławska

WARUNKI POMIARU PARAMETRÓW SPIROMETRYCZNYCH

Omówiono gazowe warunki pomiaru parametrów spirometrycznych. Przeanalizowano zmiany tych warunków podczas stosowania różnego typu przetworników spirometrycznych i oszacowano wynikające stąd błędy. Wskazano te sytuacje pomiarowe, w których należy stosować współczynniki korekcyjne (przyjęte przez autorkę jako współczynniki konwersji).

1. CHARAKTERYSTYKA PARAMETRÓW SPIROMETRYCZNYCH

Jedną z metod określenia jakości układu oddechowego jest badanie spirometryczne, które polega na kontroli parametrów gazu wydychanego z płuc: jego objętości, prędkości przepływu i ciśnienia. Do najbardziej wartościowych diagnostycznie należy tzw. test natężonego wydechu. Polega on na tym, że pacjent nabiera do płuc maksymalną objętość gazu, chwilę przetrzymuje, a następnie wydmuchuje go z największą siłą i szybkością, co zwykle trwa 4–6 sekund. Interesującym dla lekarza jest sposób, w jaki zmienia się objętość gazu w funkcji czasu $V(t)$. Najogólniej opisuje ją eksponenta w postaci:

$$V(t) = FVC \cdot (1 - e^{-\frac{t}{\tau}}) \quad (1)$$

gdzie: FVC — maksymalna objętość wydychanego gazu, tzw. natężona pojemność życiowa, τ — stała czasowa układu oddechowego, uwarunkowana oporami oddechowymi (R) i podatnością płuc na rozciąganie (C), ($\tau = R \cdot C$). Na podstawie uzyskanej krzywej natężonego wydechu wyznacza się parametry spirometryczne w postaci wartości objętości (jest to specyficzny rodzaj próbkowania krzywej) oraz chwilowej bądź średniej wartości prędkości przepływu [1], [2]. Wszystkie te parametry są miarą sprawności wentylacji płuc.

2. WARUNKI POMIARU PARAMETRÓW SPIROMETRYCZNYCH

Objętości gazu mierzone są w zmiennych warunkach ciśnienia, temperatury i wilgotności, bowiem warunki, w jakich znajduje się gaz w płucach różnią się od warunków otoczenia, w których mierzony jest wydychany gaz: np. temperatura,

wilgotność w płucach jest wyższa niż w otoczeniu (na zewnątrz). Z tego powodu wyniki pomiarów spirometrycznych koryguje się poprzez wprowadzenie odpowiedniego współczynnika przeliczeniowego tak, aby uzyskać znormalizowanie (w sensie warunków fizycznych) wartości parametrów [1], [3]. Te następnie można porównywać z wartościami należnymi dla danego pacjenta (czyli normami). Nieuwzględnienie zmienności warunków pomiaru objętości gazu jest źródłem znacznych błędów, prowadzących nawet do błędnych diagnoz medycznych.

W praktyce pomiarowej stosuje się dwa typy przetworników spirometrycznych: objętościowe (czyli kontrolujące objętość gazu) oraz przepływowe (czyli kontrolujące prędkość przepływu gazu) [1], [4]. Ze względu na różną zasadę pracy wymienionych przetworników w różny sposób uwzględnia się współczynnik zmiany warunków pomiaru.

Gaz oddechowy znajdujący się w płucach określony jest parametrami fizycznymi takimi jak: temperatura, ciśnienie, wilgotność oraz skład chemiczny. Ostatnia cecha – skład chemiczny zależy od tego, czy gaz wchodzi do płuc z zewnątrz, gdy bogaty jest w tlen, czy też wychodzi z płuc przyczyniając się do usunięcia zbędnego dla organizmu dwutlenku węgla. Zmierzona wartość objętości gazu wydechowego zależy od pozostałych parametrów fizycznych, które zgodnie z prawami gazowymi określają tę objętość. Należy zwrócić uwagę na fakt, że gaz w płucach jest ogrzany do temperatury ciała (37°C), a wydostając się na zewnątrz do otoczenia ochładza się i zmniejsza swą objętość. Także zmienia się jego wilgotność (w płucach jest on nasycony parą wodną) i ciśnienie. Te trzy cechy otoczenia mogą zmieniać się w szerokim zakresie, w wyniku czego zmieniać się będzie objętość płucna oglądana z zewnątrz. Wpływy te będą uwidaczniać się z różną siłą zależnie od rodzaju stosowanego przetwornika spirometrycznego, bowiem gaz kontaktujący się dłużej z przetwornikiem objętościowym (dzwonowym) zostanie przezeń ochłodzony, zaś w przetwornikach przepływowych pomiar objętości płucnej nastąpi szybciej zanim znacznie obniży się temperatura gazu.

Powszechnie zalecane przez producentów spirometrów współczynniki przeliczeniowe dotyczące warunków otoczenia jako warunków pomiarowych są stosowane w formie ukrytej lub jawnie w postaci stałej wartości. Określenia dotyczące warunków pomiaru (tabela 1) są następujące [1]:

ATP – aktualna temperatura, ciśnienie barometryczne i wilgotność otoczenia; są to warunki, w których gaz znajduje się w pomieszczeniu laboratoryjnym,

ATPD – aktualna temperatura i ciśnienie, suchy gaz: to gaz w suchym pomieszczeniu laboratoryjnym,

ATPS – aktualna temperatura i ciśnienie oraz nasycenie gazu parą wodną w czasie pomiaru,

BTPS – temperatura 37°C (temperatura ciała), ciśnienie normalne (760 mm Hg), nasycenie parą wodną: są to warunki, w których gaz (powietrze oddechowe) znajduje się w płucach,

STPD – temperatura 0°C , ciśnienie normalne, suchy gaz: są to warunki, w których mierzy się objętość w specjalnym celu np. przy poborze tlenu lub

wydalaniu dwutlenku węgla; taka forma przydatna jest do określenia objętości gazu przy analizie fizycznej lub chemicznej.

Tabela 1. Różnorodność warunków pomiaru parametrów spirometrycznych (wg [1], [2], [5])

Przyjęte oznaczenie warunków otoczenia		ATP	ATPD	ATPS	BTPS	STPD
temperatura	unormowana 0°C					x
	otoczenia	x	x	x		
	ciała 37°C				x	
ciśnienie	unormowane 1013 hPa (760 mm Hg)				x	x
	otoczenia	x	x	x		
wilgotność	suchy gaz		x			x
	para nasycona			x	x	
	otoczenia	x				
oznaczenia poszczególnych liter: A – actual, B – body, P – pressure, S – standard lub saturated, T – temperature						

3. WPLYW WARUNKÓW OTOCZENIA NA WARTOŚĆ OBJĘTOŚCI MIERZONEGO GAZU ZNAJDUJĄCEGO SIĘ W PŁUCACH

Aby uniezależnić wyniki pomiarów od zmiennych warunków otoczenia definiuje się odpowiedni współczynnik konwersji sprowadzający objętość wyznaczoną w zmiennych warunkach ATPS do stałych warunków BTPS panujących w płucach [1]:

$$V_{BTPS} = V_{ATPS} \cdot \frac{310}{273 + T_o} \cdot \frac{P_B - P_{H_2O}}{P_B - 47.1} \quad (2)$$

gdzie: P_B – ciśnienie barometryczne panujące w otoczeniu [mm Hg], P_{H_2O} – ciśnienie pary wodnej w temperaturze otoczenia [mm Hg], T_o – temperatura otoczenia [°C], V_{xxxx} – objętość wyznaczona w odpowiedniej temperaturze, ciśnieniu i wilgotności [l].

Uwzględnienie tych warunków pozwala na wyznaczenie wartości współczynnika konwersji K , gdzie:

$$K = \frac{V_{BTPS}}{V_{ATPS}} \quad (3)$$

Podczas pomiaru wydychanego gazu objętość jego zostaje zmniejszona na skutek obniżenia się temperatury z 37°C (to jest temperatura gazu zamkniętego w płucach) do temperatury otoczenia (np. 20°C). Zmieniają się także pozostałe czynniki jak temperatura pacjenta, ciśnienie i wilgotność. Wtedy wzór (1) a w konsekwencji współczynnik konwersji K przyjmuje bardziej złożoną postać:

$$K = \frac{273 + T_P}{273 + T_O} \cdot \frac{P_B - \frac{W}{100} \cdot P_{H_2O}(T_O)}{P_B - P_{H_2O}(T_P)} \quad (4)$$

gdzie: T_P – temperatura ciała pacjenta, T_O – temperatura otoczenia, w którym zgromadzono przygotowany do pomiarów gaz, P_B – ciśnienie barometryczne, $P_{H_2O}(T_P)$ – prężność nasyconej pary wodnej zawartej w gazie znajdującym się w płucach badanego pacjenta, którego temperatura jest równa T_P , $P_{H_2O}(T_O)$ – prężność nasyconej pary wodnej odpowiadająca temperaturze otoczenia T_O , W – wilgotność względna pomieszczenia, w którym przeprowadzane są pomiary zgromadzonego gazu.

Aby zbadać jak współczynnik konwersji zależy od wszystkich tych czynników do analizy wyrażenia (4) przyjęto zakres ich zmienności następująco:

$$T_P = 37 \div 39 [^{\circ}\text{C}],$$

$$T_O = 15 \div 25 [^{\circ}\text{C}],$$

$$P_B = 740 \div 780 [\text{mm Hg}],$$

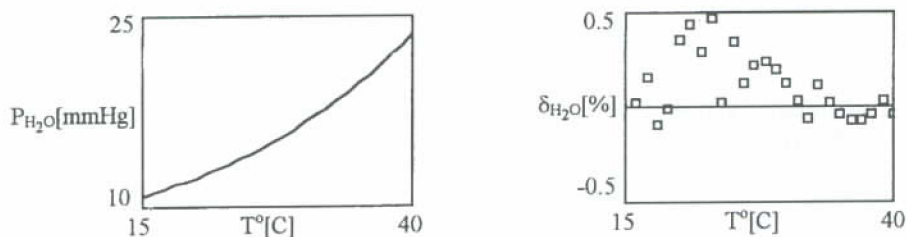
$$W = 30 \div 100 [\%],$$

Przedstawiony wyżej zakres wartości może budzić pewne wątpliwości, ponieważ w pomieszczeniu, w którym mierzony jest gaz pobrany od pacjenta, wilgotność nie sięga nigdy 100%. Tak wysoka wartość podyktowana została jednak specjalnymi warunkami, jakie stwarza stosowany często w użyciu dzwonowy spirometr wodny: działa on na zasadzie ruchu dzwonu zanurzonego w wodzie, która jest naturalnym uszczelnieniem tego dzwonu. Ruch spowodowany jest wchodzącym pod dzwon gazem.

Wartość prężności pary wodnej podana jest w literaturze w postaci tabelaryzowanej (por. tabela 3) [6]. Jest ona funkcją temperatury badanego gazu. Do obliczeń przyjęto zależność przybliżoną:

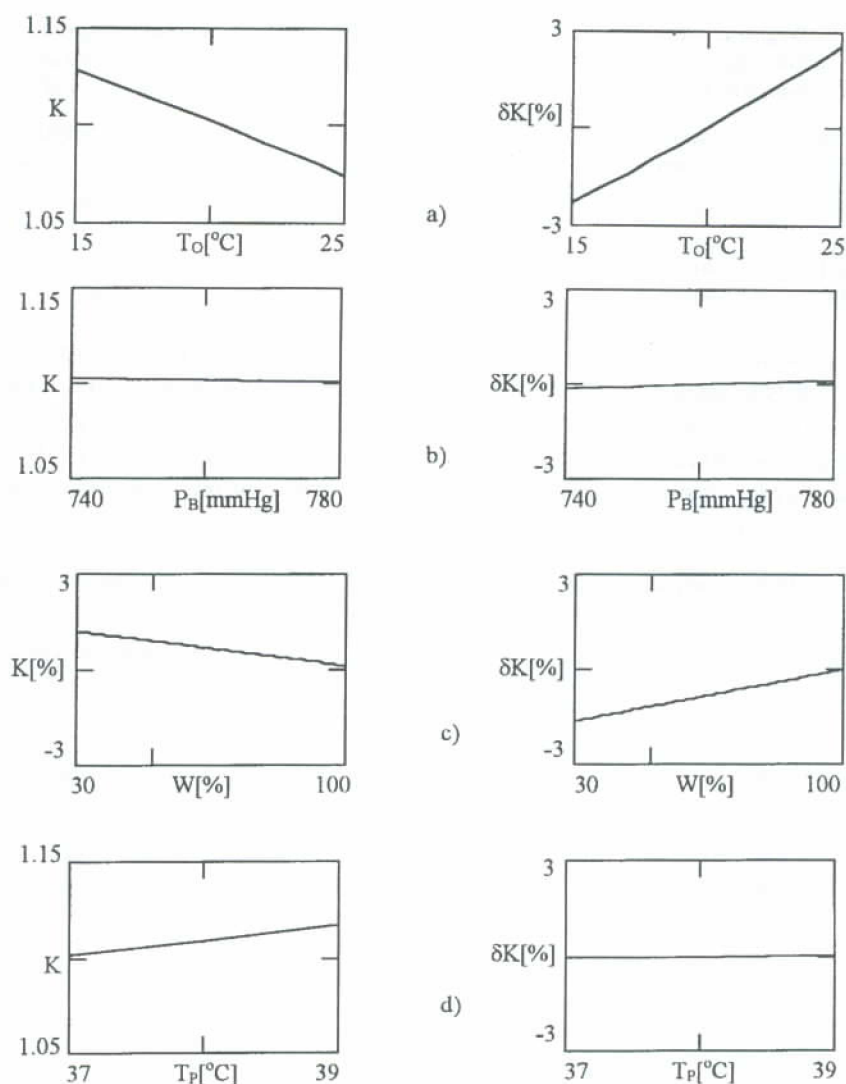
$$P_{H_2O} = 0.0006065 \cdot T^3 - 0.0087 \cdot T^2 + 0.712 \cdot T + 1.957 \quad (5)$$

Wyliczone według niej wartości ciśnienia różnią się od tych podanych w tabeli 3 nie więcej niż $\pm 0,5\%$ (rys. 1a,b).



Rys. 1. a – Zależność prężności nasyconej pary wodnej P_{H_2O} od temperatury. b – Względny błąd wyznaczenia wartości P_{H_2O} według wzoru (5)

Zależność (4) jest złożona; dlatego wartość współczynnika konwersji została przeanalizowana wybiórczo dla pojedynczego parametru (temperatury, ciśnienia lub wilgotności), podczas gdy dla pozostałych przyjęto pewną ustaloną wartość (rys. 2).



Rys. 2. Zależność współczynnika konwersji K oraz jego zmienność w funkcji różnych czynników (współczynnik odniesienia $K_o=1.102$ wyliczono dla warunków: $T_o=20^\circ\text{C}$, $T_P=37^\circ\text{C}$, $P_B=760$ mm Hg, $W=100\%$):

- a) funkcja temperatury otoczenia ($K=K(T_o)$), założenia: $T_P=37^\circ\text{C}$, $W=100\%$, $P_B=760$ mm Hg,
- b) funkcja ciśnienia barometrycznego ($K=K(P_B)$), założenia: $T_o=20^\circ\text{C}$, $T_P=37^\circ\text{C}$, $W=100\%$,
- c) funkcja wilgotności otoczenia ($K=K(W)$), założenia: $T_o=20^\circ\text{C}$, $T_P=37^\circ\text{C}$, $P_B=760$ mm Hg,
- d) funkcja temperatury pacjenta ($K=K(T_P)$), założenia: $T_o=20^\circ\text{C}$, $W=100\%$, $P_B=760$ mm Hg,

Z przedstawionych obliczeń wynika, że współczynnik konwersji K maleje wraz ze wzrostem temperatury otoczenia, wilgotności oraz ciśnienia barometrycznego zaś rośnie ze wzrostem temperatury pacjenta. Jednak zmienność K jest różna w zależności od rodzaju parametru (rys. 2 i tabela 2).

Tabela 2. Względne wartości rozrzutów współczynnika konwersji K w zmiennych warunkach pomiarowych w odniesieniu do $K_0=1.102$ (K_0 współczynnik odniesienia obliczono dla warunków, które nazwano standardowymi i wtedy: $T_0=20^\circ\text{C}$, $T_p=37^\circ\text{C}$, $P_B=760$ mm Hg, $W=100\%$)

Rodzaj parametru	Zakres zmienności	Zakres zmienności współczynnika konwersji K	Maksymalny względny rozrzut współczynnika konwersji
T_0 [$^\circ\text{C}$]	15 ÷ 25	1.128 ÷ 1.074	2.5%
T_p [$^\circ\text{C}$]	37 ÷ 39	1.102 ÷ 1.117	0.7%
P_B [mm Hg]	740 ÷ 780	1.103 ÷ 1.101	0.1%
W [%]	30 ÷ 100	1.102 ÷ 1.120	4.4%

Powyższe wyliczenia wskazują, że największy rozrzut współczynnika konwersji w rozważanym zakresie zmian warunków wykazuje wilgotność (4.4%) następnie temperatura otoczenia (2.5%). Jednak w rzeczywistych warunkach pomiarowych zaleca się stosowanie jedynie korekcji wpływu temperatury otoczenia [1], [2] jako czynnika bardzo często zmieniającego się. Dla temperatury otoczenia podaje się odpowiednie wartości współczynnika konwersji (tabela 3).

Tabela 3. Wartości współczynnika konwersji K zamiany warunków pomiaru objętości ATPS/BTPS dla ciśnienia otoczenia $P_B=760$ mm Hg (wg [1], [3], [5], [6])

Temperatura otoczenia	Ciepłota nasyconej pary wodnej	Współczynnik konwersji
T_0 [$^\circ\text{C}$]	$P_{\text{H}_2\text{O}}$ [mm Hg]	K
15	12.8	1.129
16	13.6	1.124
17	14.5	1.119
18	15.5	1.113
19	16.5	1.108
20	17.5	1.102
21	18.6	1.097
22	19.8	1.092
23	21.0	1.086
24	22.4	1.081
25	23.7	1.075

4. WPLYW PARAMETRÓW OTOCZENIA NA DOKŁADNOŚĆ POMIARU OBJĘTOŚCI RÓŻNEGO TYPU PRZETWORNIKAMI SPIROMETRYCZNYMI

4.1. Pomiary parametrów mierzonego gazu

Wciągnięty z otoczenia zimny i suchy gaz pozostając w płucach odpowiednio długo ogrzewa się i staje się wilgotny. Przy wydmuchiowaniu go na zewnątrz zaczyna zmieniać swoje parametry pod wpływem otoczenia. Aby stwierdzić jak przebiega zmiana jego cech przeprowadzono odpowiednie pomiary. Warunki pomiaru były następujące: temperatura otoczenia $T_0=22^\circ\text{C}$, wilgotność względna w otoczeniu

$W=36\%$, ciśnienie atmosferyczne $P_B=748$ mm Hg. Przed wydechem gaz przytrzymywany był w płucach przez okres 2 sekund.

Na początku mierzono temperaturę wydychanego (w sposób natężony) gazu (termometr elektroniczny THERM 2280-2 współpracujący z czujnikiem NiCr typ TK 153-2B) termometrem umieszczonym na różnej głębokości G w jamie ustnej (punkt odniesienia stanowiły zęby dolnej szczęki). Pomiary te przeprowadzono u dwóch osób, trzykrotnie dla każdej głębokości zanurzenia czujnika temperatury. Odpowiednie wyniki zamieszczono w tabeli 4.

Tabela 4. Pomiar temperatury T [°C] wydychanego gazu w ustach przy różnej głębokości G [cm] zanurzenia czujnika w jamie ustnej

G [cm]	Temperatura u pacjenta A			T_{tr}	Temperatura u pacjenta B			T_{tr}
1	34.0	35.0	34.6	34.5	33.3	33.3	33.2	33.3
2	32.4	31.1	32.7	32.1	33.2	32.8	32.7	32.9
3	33.3	33.1	32.6	33.0	33.0	33.0	32.9	33.0
4	33.4	32.9	32.7	33.0	34.5	33.3	33.1	33.6
średnio				33.15	średnio			33.20

Następny eksperyment polegał na obserwacji, jak czas przytrzymywania w płucach chłodnego powietrza pobranego z otoczenia wpływa na ogrzanie się gazu. Proces ogrzewania gazu ma miejsce w próbie natężonego wydechu, gdy pacjent wciąga do płuc maksymalną objętość gazu, chwilę przytrzymuje go w płucach, a następnie wydycha do przetwornika. Pomiary przeprowadzono dla jednego pacjenta (dla próby natężonego wydechu, objętość FVC była równa około 3,5 litra). Gaz przytrzymywano w płucach przez okres 5 do 40 sekund, a następnie czterokrotnie mierzono jego temperaturę przy pomocy czujnika zanurzonego w jamie ustnej na głębokości 4 cm. Rezultaty przedstawiono w tabeli 5.

Tabela 5. Zależność temperatury wydychanego gazu od czasu przytrzymywania go w płucach przed wykonaniem testu natężonego wydechu ($T_0=20^\circ\text{C}$)

Czas przytrzymywania gazu w płucach [s]	Temperatura wydychanego gazu [°C]				Temperatura średnia
40	34.3	34.7	35.2	34.0	34.6
20	34.0	34.4	34.9	34.2	34.3
10	33.4	32.8	34.3	33.9	33.5
5	33.1	34.0	33.6	33.4	33.5

Mierzono także wilgotność wydychanego gazu. Stosowano do tego celu wilgotnościomierz elektroniczny (THERM 2282-2 współpracujący z czujnikiem typu K 9626-1R), który umieszczono w jamie ustnej pacjenta podczas natężonego wydechu (tabela 6).

Do pomiaru objętości wydychanego gazu stosowane są różnego typu przetworniki pomiarowe. Można je podzielić na dwie grupy uwzględniające sposób prze-

Tabela 6. Pomiar wilgotności w [%] gazu w jamie ustnej podczas testu natężonego wydechu dla dwóch pacjentów

L.p.	Pacjent A	Pacjent B
1	94.5	91.5
2	91.6	91.4
3	96.5	99.4
4	95.0	91.4
5	97.2	98.8
6	91.4	94.0
7	94.0	91.5
8	97.2	92.4
9	93.8	99.7
10	99.7	97.4
średnio	95.1	94.8

tworzenia sygnału. Pierwszą grupę stanowią przetworniki typu przepływowego, drugą – typu objętościowego. Następne badania przeprowadzono w obecności takich przetworników spirometrycznych.

4.2. Przetworniki typu przepływowego

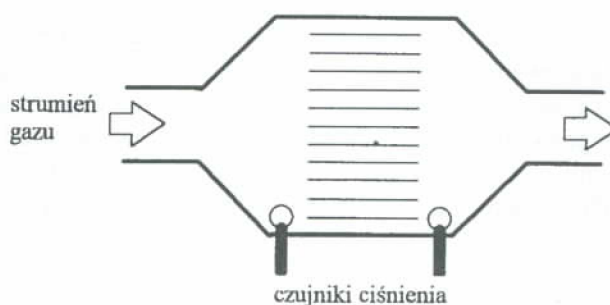
Do przetworników przepływowych (zwanych też pneumotachometrami) zaliczane są [4]:

- 1) głowica Fleischa,
- 2) przepływomierz termoanemometryczny,
- 3) turbinka,
- 4) przepływomierz ultradźwiękowy,
- 5) przepływomierz wirowy.

Szczegółowy opis własności wymienionych przetworników spirometrycznych można znaleźć w [4], [7]. Do najczęściej stosowanych należy głowica Fleischa. Jej zasada działania jest następująca: strumień gazu przepływa przez rurkę zawierającą ustalony opór przepływu, który stanowi przewężenie rurki wykonane najczęściej w postaci wiązki drobnych rureczek, a ostatnio w postaci sitka o bardzo małych oczkach. Powoduje to powstanie spadku ciśnienia, który jest liniowo zależny od prędkości przepływu (zgodnie z równaniem Poiseuille'a). Pomiar tego ciśnienia odbywa się w dwóch punktach: przed oraz za sitkiem (oporem), zwykle w odległości około dwóch centymetrów (rys. 3).

Gaz znajdujący się w płucach jest wilgotny i ciepły (warunki BPTS). Wydychany na zewnątrz do przetwornika może nieznacznie zmienić swoje parametry ponieważ pomiar ich odbywa się bardzo blisko ust i praktycznie nie ma możliwości istotnego ochłodzenia czy też zmiany jego wilgotności. Aby jednak stwierdzić, jak wielkie są to zmiany przeprowadzono eksperymenty z trzema przetwornikami przepływowymi:

- turbinką spirometru B-14 firmy FARUM,



Rys. 3. Budowa głowicy Fleischa

- przetwornikiem zwężkowym z zimnym i grzanym sitkiem (sitko stanowi opór przepływu) spirometru SA-10 firmy ZALIMP,
- głowicą Fleischa pracującą w spirometrze PNEUMOSCREEN II firmy JAEGER.

Przetwornik turbinkowy wykonany z plastiku miał temperaturę otoczenia. Przetwornik zwężkowy w obudowie metalowej pracował w temperaturze otoczenia, a następnie został ogrzany (za pomocą własnego wewnętrznego grzejnika). Po upływie 15 minut uzyskał temperaturę około 41.4°C (do takiej temperatury została ogrzana siatka pełniąca w przetworniku rolę oporu przepływu). Pacjent wykonywał natężony wydech do przetwornika i w tym czasie zmierzono maksymalną temperaturę wydmuchiwanego gazu, która ustaliła się na wejściu i na wyjściu przetwornika (temperatura otoczenia była równa 22°C). Wyniki zamieszczono w tabeli 7.

Tabela 7. Rezultaty pomiaru temperatury gazu wydmuchiwanego do przepływowych przetworników spirometrycznych

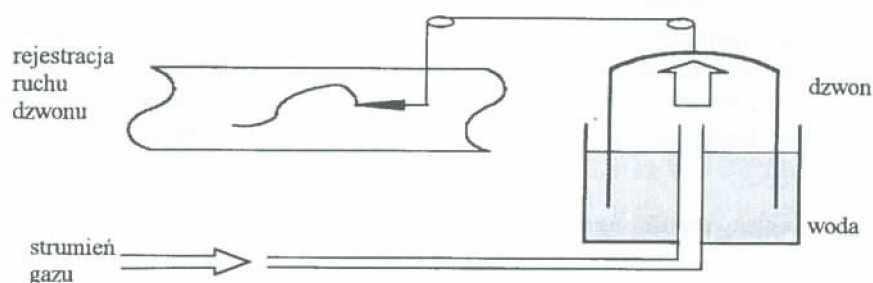
L.p.	Temperatura wejściowa [$^{\circ}\text{C}$]	Temperatura wyjściowa [$^{\circ}\text{C}$]		
		rodzaj przetwornika		
		turbinkowy	zwężkowy	
			zimny	podgrzewany
1	34.2	33.5	33.2	36.8
2	34.5	33.1	33.4	36.5
3	33.8	33.4	33.5	36.4
4	34.0	33.0	33.5	36.7
średnio	34.12	33.25	33.40	36.6

Podczas pomiarów parametrów spirometrycznych za pomocą przetworników przepływowych jak turbinka czy zwężka następuje zmiana wilgotności gazu z poziomu pary nasyconej do wilgotności względnej prawie o 10% niższej. Zmienia się też jego temperatura lecz nie schładza się on do temperatury otoczenia. Dzięki zastosowaniu podgrzewania sitka oporowego (ma to zapobiec zmianie oporu prze-

pływowego na skutek zaklejania się oczek sitka skraplającą się parą wodną zawartą w powietrzu wydechowym (para nasycona) co ma miejsce wtedy, gdy sitko jest zimne) temperatura gazu wydychanego praktycznie nie ulega zmianie. Uzyskane wyniki pomiarów pozwoliły na oszacowanie wartości współczynnika konwersji K . Różnice wyznaczono w stosunku do dwóch sytuacji pomiarowych (tabela 9): przy uwzględnianiu pełnych warunków pomiarowych zgodnie ze wzorem (1) oraz przy zaniedbaniu tych wpływów (tzn. gdy $K=1$).

4.3. Przetwornik typu dzwonowego

Przetwornikiem tym jest poruszający się dzwon. Jego ruchy odbywają się na skutek wchodzenia do niego wydychanego gazu. Dzwon zanurzony jest w wodzie, która stanowi naturalne uszczelnienie (rys. 4). Ten rodzaj przetwornika stosowany jest od bardzo dawna. Obecnie, mimo nowoczesnych rozwiązań pomiarowej głowicy spirometrycznej obserwuje się powrót do najprostszego i pierwszego rozwiązania: dzwonu. Ma on podstawową zaletę: prócz możliwości pomiaru wydychanego gazu można wykonywać nim pomiary objętości zalegających (np. [1]).



Rys. 4. Zasada działania spirometrycznego przetwornika dzwonowego

Dostający się pod dzwon ciepły gaz będzie zatem ochładzać się. Aby uzyskać prawidłową wartość objętości mierzonego gazu należy skorygować ją o współczynnik konwersji K zgodnie ze wzorem (3). Korekcję tę należy jednak zastosować dopiero po ustaleniu się warunków termicznych pod dzwonem. Praktycznie nie ma takiej możliwości, ponieważ wymiana (zmiana objętości) gazu odbywa się w ciągu kilku sekund. Ustalenie się warunków termicznych może nastąpić także dopiero po wielokrotnej wymianie gazu, gdy dzwon nagrzej się do pewnej średniej temperatury będącej rezultatem nałożenia się temperatury otoczenia i temperatury ciała pacjenta.

Podczas testu natężonego wydechu, który trwa około 6 sekund następuje zmiana warunków termicznych pod dzwonem. Pomiarowi podlegają objętości w różnych momentach czasu (np. $FEV_{0.5}$, FEV_1) więc nie jest możliwe stosowanie stałego współczynnika konwersji K . Przyjęcie go stałym jest dodatkowym źródłem błędu pomiarowego.

W próbie natężonego wydechu kontroluje się objętość gazu narastającą eksponencjalnie. Gaz ten małymi porcjami wchodzi pod dzwon. Aby przeanalizować sposób ustalania się temperatury pod dzwonem przyjęto następujące założenia:

- 1) temperatura wchodzącego gazu jest równa 37°C ,
- 2) czas ustalania się wspólnej temperatury gazu i dzwonu przy wejściu każdej małej porcji gazu ΔV jest stały i bardzo krótki (bliski zeru),
- 3) nie ma wypromieniowania ciepła ze ścianek dzwonu do otoczenia,
- 4) odbiorcą ciepła z gazu jest cała jednolita powierzchnia dzwonu co oznacza, że dnem nie jest powierzchnia wody.

Zgodnie z bilansem cieplnym można zapisać, że:

$$Q_g = Q_d \quad (6)$$

gdzie Q oznacza ilość ciepła odpowiednio dla gazu (g) i dzwonu (d). Ciepło to można wyliczyć według następujących wzorów:

$$Q_g = m_g \cdot c_g \cdot (37 - T_X) \quad (7)$$

$$m_g = \rho_g \cdot \Pi \cdot r^2 \cdot l \quad (8)$$

$$Q_d = m_d \cdot c_d \cdot (T_X - T_o) \quad (9)$$

$$m_d = \rho_d \cdot d \cdot (2 \cdot \Pi \cdot r^2 + 2 \cdot \Pi \cdot r \cdot l) \quad (10)$$

gdzie:

- g, d — indeksy określające odpowiednie własności fizyczne gazu (g) i dzwonu (d),
- m — masa,
- c — ciepło właściwe,
- ρ — gęstość,
- r — średnica dzwonu,
- l — wysokość dzwonu,
- d — grubość folii, z której wykonano dzwon,
- T_o — temperatura otoczenia,
- T_X — temperatura po ustaleniu wymiany ciepła między gazem i dzwonem.

W każdym momencie dostaje się do dzwonu porcja gazu o objętości ΔV równej $\Pi r^2 \Delta l$. Można więc zapisać:

pierwszy moment:

$$\rho_g \cdot \Pi \cdot r^2 \cdot \Delta l \cdot (37 - T_1) = \rho_d \cdot (2 \cdot \Pi \cdot r^2 + 2 \cdot \Pi \cdot r \cdot \Delta l) \cdot d \cdot (T_1 - T_o) \quad (11)$$

drugi moment:

$$\begin{aligned} \rho_g \cdot \Pi \cdot r^2 \cdot \Delta l \cdot (37 - T_2) = & \rho_d \cdot (2 \cdot \Pi \cdot r^2 + 2 \cdot \Pi \cdot r \cdot \Delta l) \cdot d \cdot (T_2 - T_1) + \\ & + \rho_d \cdot 2 \cdot \Pi \cdot r \cdot \Delta l \cdot d \cdot (T_2 - T_o) + \rho_d \cdot \Pi \cdot r^2 \cdot \Delta l \cdot (T_2 - T_1) \end{aligned} \quad (12)$$

i -ty moment:

$$\rho_g \cdot \Pi \cdot r^2 \cdot \Delta l \cdot (37 - T_i) = \rho_d \cdot [2 \cdot \Pi \cdot r^2 + 2 \cdot \Pi \cdot r \cdot (i-1) \cdot \Delta l] \cdot d \cdot (T_i - T_{i-1}) + \\ + \rho_d \cdot 2 \cdot \Pi \cdot r \cdot \Delta l \cdot d \cdot (T_i - T_o) + \rho_d \cdot \Pi \cdot r^2 \cdot (i-1) \cdot \Delta l \cdot (T_i - T_{i-1}) \quad (13)$$

gdzie: T_i – temperatura, która ustaliła się w i -tej chwili.

Postać różniczkowa równania (13) jest następująca:

$$A \cdot r \cdot [37 - T(t)] \cdot \delta l = B \cdot [2 \cdot r + 2 \cdot l(t)] \cdot d \cdot \delta T + \\ B \cdot 2 \cdot d \cdot [T(t) - T_o] \cdot \delta l + A \cdot r \cdot l(t) \cdot \delta T \quad (14)$$

gdzie $A = \rho_g \cdot c_g$, $B = \rho_d \cdot c_d$.

Trzeba więc rozwiązać równanie różniczkowe w postaci:

$$[A \cdot r \cdot (37 - T) - 2 \cdot B \cdot d \cdot (T - T_o)] \cdot \delta l = \\ = [B \cdot (2 \cdot r + 2 \cdot l)] \cdot d + A \cdot r \cdot l] \delta T \quad (15)$$

Przy przejściu na objętość (δV zamiast δl) powyższe równanie spełnia funkcja:

$$T(V) = K - \frac{L}{(M + N \cdot V)} \quad (16)$$

gdzie:

$$K = \frac{A \cdot r \cdot 37 + 2 \cdot d \cdot T_o}{A \cdot r + 2 \cdot d} \quad (17)$$

$$L = \frac{2 \cdot \Pi \cdot A \cdot r^4 \cdot d \cdot (37 - T_o)}{A \cdot r + 2 \cdot d} \quad (18)$$

$$M = 2 \cdot \Pi \cdot r^3 \cdot d \quad (19)$$

$$N = a \cdot r + 2 \cdot d \quad (20)$$

Aby znaleźć kształt funkcji opisującej zmiany temperatury w czasie natężonego wydechu gazu do dzwonu założono, że objętość gazu wchodzącego do dzwonu zmienia się z upływem czasu t ($t < 0$, $t_{nw} >$, t_{nw} – czas trwania natężonego wydechu) zgodnie z zależnością (1).

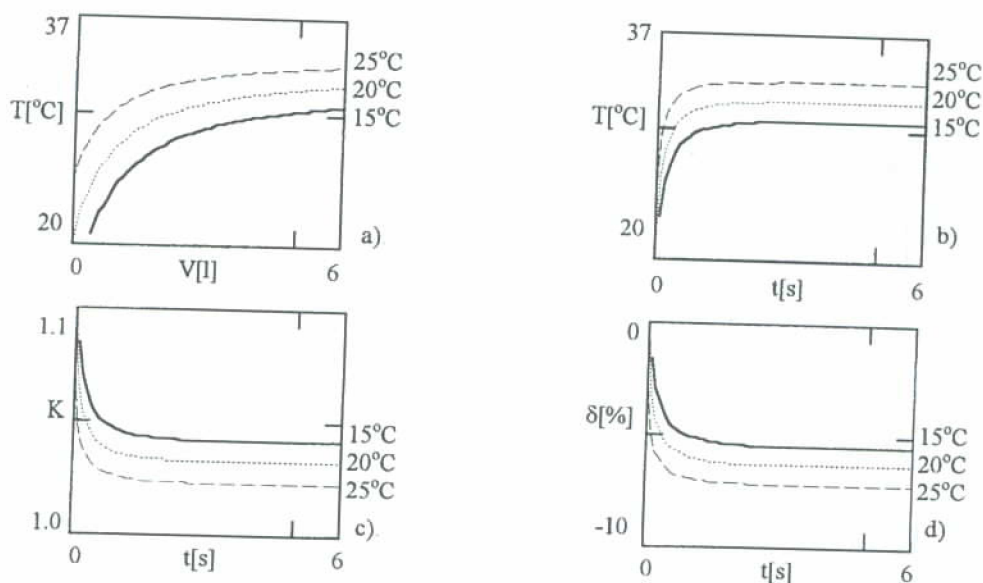
Dla przykładowych obliczeń przyjęto, że:

$$\begin{aligned} A &= 0.0222 B, \\ r &= 11 \text{ cm}, \\ d &= 0.03 \text{ cm}, \end{aligned} \quad (21)$$

oraz warunki brzegowe:

$$\begin{aligned} T_o &= 20^\circ \text{C}, \\ l_o &= 0. \end{aligned}$$

Można wtedy zauważyć, że temperatura pod dzwonem zmienia się stopniowo wraz ze wzrostem wchodzącej objętości (rys. 5a), zaś szybkość tych zmian w czasie uzależniona jest od szybkości narostu objętości (rys. 5b).



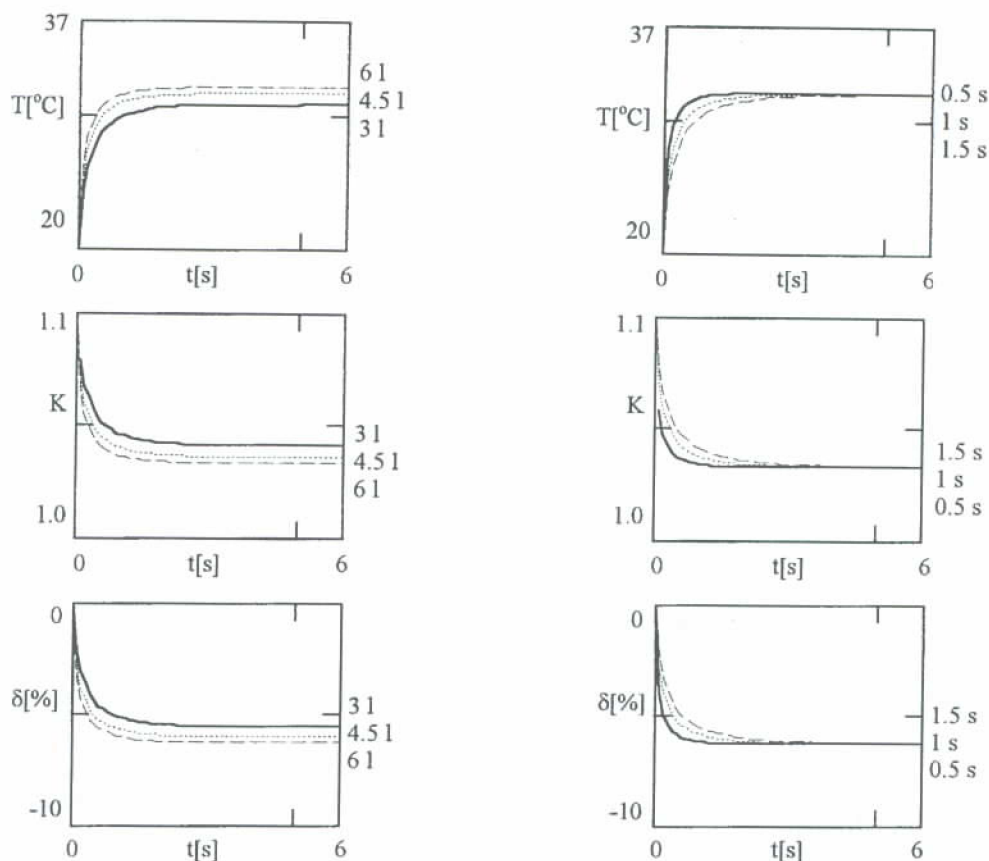
Rys. 5. Sposób ustalania się temperatury pod dzwonem podczas wchodzenia ciepłego gazu (37 $^{\circ}\text{C}$ oraz warunki (21)) dla temperatury otoczenia 15–20–25 $^{\circ}\text{C}$:
 a) zmiana temperatury w funkcji objętości, b) zmiana temperatury w funkcji czasu, c) zmienność współczynnika konwersji K w funkcji czasu, d) błąd związany ze zmiennością współczynnika konwersji (w stosunku do K_0 ($T_0=20^{\circ}\text{C}$)=1.102).

Jeśli przyjąć za wartość odniesienia wartość współczynnika konwersji (ustalonego dla standardowej temperatury otoczenia 20 $^{\circ}\text{C}$) $K=1.102$, to można zaobserwować zmienność rzeczywistej wartości K podczas całego eksperymentu natężonego wydechu (rys. 5c) i związany z tym błąd (rys. 5d). Podobne zmiany wystąpią, gdy tylko zmieniać się będzie maksymalna objętość FVC wchodzącego gazu (rys. 6a) lub szybkość τ (stała czasowa układu oddechowego) z jaką będzie on wchodzić pod dzwon (rys. 6b).

5. WNIOSKI

Dokładność pomiaru parametrów spirometrycznych uwarunkowana jest dwoma czynnikami: jakością aparatury oraz zewnętrznymi warunkami, w jakich nastąpił pomiar. Powietrze wydychane z płuc przejmuje często własności otoczenia i zmienia swoją objętość, co powoduje powstanie znacznych błędów. Ze względu na odmienność warunków pomiarowych w stosunku do warunków jakie panują we wnętrzu płuc wyniki normuje się przemnażając je przez specjalny współczynnik konwersji.

Gaz w płucach charakteryzuje stosunkowo wysoka temperatura (około 37 $^{\circ}\text{C}$), duża wilgotność (około 100%). W otoczeniu, w którym gaz ten podlega pomiarowi panuje temperatura niższa (około 20 $^{\circ}\text{C}$), niska wilgotność (około 40%). Przy



Rys. 6. Wpływ parametrów natężonego wydechu: wartości FVC oraz stałej czasowej τ układu oddechowego na sposób ustalania się temperatury pod dzwonem i wynikające stąd błędy:
a) zmienna wartość FVC: 3–4.5–6 litrów, b) zmienna stała czasowa τ : 0.5–1–1.5 sekundy

przyjęciu założenia odnośnie zakresu zmian temperatury pacjenta, temperatury otoczenia, ciśnienia barometrycznego i wilgotności w otoczeniu stwierdzono, że temperatura otoczenia i wilgotność mają najbardziej znaczący wpływ. Wpływ temperatury ciała pacjenta i ciśnienia barometrycznego jest natomiast do pominięcia.

W spirometrii stosowane są dwa typy przetworników: objętościowe i przepływowe. Przetwornik objętościowy jest umieszczony w pewnej odległości od pacjenta i dlatego wchodzący do niego ciepły gaz oddechowy zdąży się ochłodzić do temperatury bliskiej temperaturze otoczenia. W zależności od szczegółów konstrukcyjnych (które decydują, czy to dzwon wodny (tj. z uszczelnieniem wodnym czy suchy) może także zmieniać się wilgotność badanego gazu. Jednak w większości współczesnych rozwiązań uszczelnienie stanowi woda, dlatego gaz oddechowy bardzo nieznacznie zmienia wilgotność i ostatecznie wpływ ten jest do pominięcia.

W przypadku stosowania przetworników przepływowych umieszcza się je bardzo blisko ust i zmiana wilgotności wydychanego gazu jest zupełnie nieistotna. Nieco zmienia się temperatura gazu na skutek jego kontaktu z zimną obudową głowicy spirometrycznej. Jeśli w głowicy występuje podgrzewanie zapobiegające głównie zaklejaniu sitka oporowego (lub rurek) parą wodną, to praktycznie nie ma zmiany temperatury gazu oddechowego i w ten sposób eliminuje się wpływ temperatury otoczenia. Odpowiednie porównania przedstawiono w tabeli 8.

Tabela 8. Wartości współczynnika konwersji K stosowanego do przeliczeń w pomiarach spirometrycznych

Warunki pomiaru	Rodzaj przetwornika				Warunki ogólnie przyjętych reguł postępowania [3]
	przepływowy			dzwonowy	
	turbinka	zwężkowy			
		zimny	grzany		
temperatura gazu [°C]	35.0	34.0	36.6	21.8	22.0
współczynnik konwersji K	1.014	1.020	1.003	1.093	1.092
błąd względny [%] gdy przyjąć $K=1$	−1.4	−2.0	−0,3	−8.5	—
błąd względny [%] gdy przyjąć $K=1.092$	7.7	7.1	8.9	−0.1	—

Wartość współczynnika konwersji, a więc wpływ parametrów otoczenia należy zatem uwzględnić zależnie od rozwiązania konstrukcyjnego przetwornika spirometrycznego. Objętościowy przetwornik dzwonowy z uszczelnieniem wodnym bezwzględnie wymaga korekcji termicznej wpływu otoczenia, bowiem w przypadku nie uwzględnienia tego pojawi się dodatkowy znaczny błąd rzędu 9%. Podczas testu natężonego wydechu temperatura mierzonej objętości gazu zmienia się zależnie od szybkości wchodzenia gazu pod dzwon. Jest to spowodowane wymianą ciepła między zimnym dzwonem a ciepłym gazem wydechowym. Ostatecznie temperatura ta ustala się. Stosowany współczynnik konwersji K zmienia więc swą wartość i jest funkcją czasu zgodnie z zależnością $K=K(T_o(t))$. Spowodowane jest to tym, że na samym początku natężonego wydechu gaz płucny zostaje ochłodzony do temperatury otoczenia zaś w dalszej fazie jego temperatura podnosi się do pewnej wartości średniej $T_{sr}=T_p-T_o$. Wyznaczona więc na początku wartość współczynnika konwersji maleje wraz z upływem czasu natężonego wydechu. Ustalona na końcu testu średnia temperatura zależy także od własności fizycznych materiału

(gęstości, ciepła właściwego), z którego wykonany jest dzwon, a także od wielkości objętości gazu, który wszedł do środka. Największy gradient zmian temperatury gazu ma miejsce w początkowej fazie natężonego wydechu (do około dwóch sekund) tzn. tam, gdzie mierzone są parametry $FEV_{0.5}$, FEV_1 itd.

W przypadku grzanego przetwornika przepływowego nie potrzeba stosować korekcji termicznej. Wprowadzenie jej spowoduje powstanie dodatkowego błędu o wartości rzędu 9%. Trudno obliczyć współczynnik konwersji dla przepływowego przetwornika nie grzanego ponieważ temperatura badanego gazu ma wartość pośrednią pomiędzy temperaturą pacjenta a temperaturą otoczenia. W zależności od rodzaju materiału przetwornika, a właściwie od wartości współczynnika przewodnictwa termicznego tego materiału wypadkowa temperatura będzie miała różną wartość. Dlatego celowym byłoby ustalenie na drodze badań eksperymentalnych (przeprowadzonych przez producenta) wpływu przewodnictwa termicznego materiału przetwornika na wartość współczynnika konwersji.

WYKAZ OZNACZEŃ

$V(t)$	— objętość gazu w funkcji czasu
FVC	— maksymalna objętość wydychanego gazu, tzw. natężona pojemność życiowa
τ	— stała czasowa układu oddechowego ($\tau = R \cdot C$)
R	— opory oddechowe
C	— podatność płuc na rozciąganie
P_B	— ciśnienie barometryczne panujące w otoczeniu
P_{H_2O}	— ciśnienie pary wodnej w temperaturze otoczenia
T_O	— temperatura otoczenia
V_{xxx}	— objętość wyznaczona w odpowiedniej temperaturze, ciśnieniu i wilgotności
K	— współczynnik konwersji warunków pomiarowych
T_p	— temperatura pacjenta
W	— wilgotność względna pomieszczenia
T	— temperatura
ΔV	— porcja gazu
Q	— ilość ciepła
g	— indeks określający własności fizyczne gazu
d	— indeks określający własności fizyczne dzwonu
m	— masa
c	— ciepło właściwe
ρ	— gęstość
r	— średnica dzwonu
l	— wysokość dzwonu
d	— grubość folii, z której wykonano dzwon
T_x	— temperatura po ustaleniu wymiany ciepła między gazem i dzwonem

LITERATURA

1. Cotes J.: *Czynność płuc*. PZWL, Warszawa 1969.
2. Campbell E.J.M.: *Terminology and symbols used in respiratory physiology*. Brit. J. Anaesth. 1957, 29, p. 534—539.
3. Forster I.I., Dubois A.B., Briscoe W.A., Fisher A.B.: *The lung. Yer Book Med. Publ.*, Chicago — London 1986.
4. Buess C., Boutellier U., Koller E.: *Pneumotachometers*. W: *Encyclopedia of medical devices and instrumentation*. vol 4, (Webster J.) Willey, NY 1987, p. 2319—2324.
5. Nunn J.F.: *Kliniczna fizjologia oddychania*. PZWL, Warszawa 1981.
6. *Poradnik fizykochemiczny*. WNT, Warszawa 1974, s. 132.
7. Hankinson J.L., Viola J.O.: *Dynamic BTPS correction factors for spirometric data*. J. Appl. Physiol., 1983, no 4 (55), p. 1354—1360.

THE MEASUREMENT CONDITIONS OF THE SPIROMETRIC PARAMETERS

Summary

One of the most popular tests of the respiratory system is the forced expiration, where volumes and flows velocities are under control. They are measured in different conditions of pressure, temperature and humidity because the gas closed inside of the lungs is warm and water vapour saturated, and outside—generally-cold. For this reason the special coefficient is calculated to translate such extremely different conditions. For the first-bell transducer specially the temperature of the surrounding gas must be taken into consideration. For the second — the flow transducer (with hot wire screen) the temperature influence must be neglected.